

**Identifiant unique de document : GEO-MULTI-LATERAL-SPECS-LI-H2-CO2-EAVOR-FD-2026\_Rev2G**

Révision : 2G

Date de la version : 11 août 2026

*Mots-clés : lithium saumure géothermique, complétion, échangeurs parallèles, réinjection CO<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> supercritique, thermosiphon, hydrogène blanc, puits exploration, puits développement, Eavor-Loop, forage multilatéral fermé, Rock-Pipe, sections 8 pouces*

## **Spécifications de forage et d'installations pour production de lithium à partir de fluide de formation, réinjection et circulation de CO<sub>2</sub>, exploration et développement d'hydrogène blanc, et systèmes radiateurs fermés de type « Eavor »**

Le présent dossier présente successivement, dans l'ordre demandé, les spécifications techniques de forage, de complétion et de surface pour quatre domaines distincts. Chaque domaine est traité séparément. Aucune hybridation géométrique n'est proposée entre les systèmes ouverts de production de saumure et les systèmes fermés de type radiateur multilatéral.

### **1. Spécifications de forage pour produire du lithium du fluide de formation exploité en surface, type de complétion probable et gestion des installations de surface**

La production de lithium à partir de saumures géothermiques repose sur un système ouvert de type doublet. L'architecture typique s'apparente à une antenne de homard : le puits injecteur et le puits producteur sont forés à partir d'un même pad, séparés de l'ordre de dix mètres en surface, puis s'éloignent progressivement pour atteindre des points d'injection et de production suffisamment distants dans le réservoir. Cette géométrie est celle des doublets parisiens classiques (Dogger) et des projets Upper Rhine Graben. Elle n'est pas confondue avec un réseau multilatéral à doigts intersectés.

Les sections de forage progressent classiquement jusqu'à un trou ouvert ou un liner fendu de 7 à 9 5/8 pouces dans le réservoir (grès ou socle fracturé). La complétion probable utilise un casing de production en acier API (P110 ou L80) ou, de préférence pour les saumures corrosives riches en chlorures, CO<sub>2</sub> et H<sub>2</sub>S, des tubulars mécaniquement linés (MLT) en alliage 625 ou 680. Ces derniers ont démontré une absence de corrosion mesurable après dix-huit mois d'exposition à 360 °C dans des conditions analogues à celles du Salton Sea. Packers métalliques haute température, joints d'expansion et éventuellement pompe électrique submersible haute température complètent l'équipement de production. Le tubing de production est choisi en duplex ou en alliage nickel.

En surface le fluide chaud traverse d'abord un train d'échangeurs de chaleur. L'extraction du lithium (DLE par adsorption, échange d'ions ou procédés électrochimiques) intervient ensuite, suivie de la précipitation sous forme de carbonate ou d'hydroxyde. Le risque principal d'encrassement des échangeurs provient de la silice, des carbonates et des sulfates qui précipitent lors du refroidissement. La stratégie de continuité d'exploitation consiste à disposer de bancs d'échangeurs en parallèle (deux à quatre trains indépendants). Chaque train peut être isolé, nettoyé chimiquement ou mécaniquement et remis en service tandis que les autres continuent à produire. Ce dimensionnement augmente le CAPEX de 25 à 40 % mais maintient une disponibilité opérationnelle supérieure à 95-98 %, limitant les arrêts de maintenance à des interventions partielles. Des inhibiteurs d'échelle et un contrôle de pH sont injectés en continu. La saumure appauvrie est réinjectée.

Limitation connue des doublets de type gélule parisienne : au fil des années la plume d'eau refroidie rejoint le puits de production, ce qui provoque un déclin de la température du fluide extrait. Certaines méthodes de gestion (débits adaptés, séquençage d'injection, optimisation de l'espacement) permettent de ralentir ce phénomène. L'objectif technique est de faire en sorte que la longévité des cuvelages et des équipements de surface devienne le facteur limitant de la durée d'exploitation plutôt que la capacité thermique du réservoir.

### **2. Réinjection de CO<sub>2</sub> (cryogénique ou non) et création d'un circuit exploitant la chaleur du sol par circulation de CO<sub>2</sub>, éventuellement supercritique, avec formules thermodynamiques**

Le dioxyde de carbone peut être réinjecté sous forme cryogénique pour le stockage géologique pur (CCS). Pour l'extraction de chaleur, le régime supercritique (point critique 31,1 °C et 73,8 bar) est préférable. Dans un circuit fermé le CO<sub>2</sub> dense et froid est injecté dans le puits descendant, s'échauffe par conduction le long des sections horizontales, et remonte dans le puits producteur avec une densité nettement inférieure. La différence de densité (pouvant atteindre plusieurs centaines de kg/m<sup>3</sup>) génère un thermosiphon.

La force motrice du thermosiphon s'écrit  $\Delta P \approx (\rho_{\text{froid}} - \rho_{\text{chaud}}) \cdot g \cdot \Delta z - \Sigma \text{ pertes par frottement}$ , où les pertes sont calculées avec le facteur de Darcy-Weisbach ou l'équation de Haaland. L'enthalpie du fluide est extraite des tables d'équation d'état de Span et Wagner. La puissance thermique récupérée est  $Q = \dot{m} \cdot (h_{\text{sortie}} - h_{\text{entrée}})$ . La puissance nette après détente en turbine et recompression s'exprime  $\dot{m} \cdot [\eta_{\text{turbine}} \cdot (h_{\text{entrée turbine}} - h_{\text{sortie is}}) - (1/\eta_{\text{compresseur}}) \cdot (h_{\text{sortie comp}} - h_{\text{entrée comp}})]$ . Les simulations indiquent un optimum d'injection autour de 12 à 16 MPa pour maximiser simultanément le débit thermosiphonique et la température de sortie. Le cycle fermé évite tout contact chimique avec la formation, élimine les risques de dépletion et de sismicité induite, et ne génère pas de solides à traiter.

### 3. Forage d'un puits d'exploration de l'hydrogène blanc et tests

L'exploration de l'hydrogène natif s'effectue par des puits verticaux ou légèrement déviés forés jusqu'à des profondeurs de 1 000 à 3 655 m. Le puits PTH-2 de La Française de l'Énergie en Moselle, foré à 3 655 m, constitue actuellement le forage dédié le plus profond. Le programme intègre un mud-logging systématique des gaz libres, des prélèvements d'échantillons de gaz et de fluides, des carottes scellées et des tests de production (DST ou flow tests après perforation). Les concentrations mesurées atteignent plusieurs dizaines de pour cent d'hydrogène dans certains intervalles. La complétion doit prendre en compte le risque d'embrittlement hydrogène : les matériaux de casing et de tubing sont sélectionnés parmi les aciers austénitiques à forte teneur en nickel (316L minimum 12 % Ni) ou les alliages nickel, et les ciments sont formulés pour une faible perméabilité. Après les tests initiaux le puits peut être équipé de sondes in situ (SYSMOG pour concentration dissoute, SYSPROG pour membranes de séparation).

#### 3.1 Puits de développement pour l'exploitation de l'hydrogène blanc

Un puits de développement reprend les mêmes principes de construction mais optimise le diamètre de production et l'architecture pour un débit commercial durable. La complétion intègre éventuellement des membranes de séparation hydrogène-eau en fond de puits afin de remonter un flux enrichi. En surface le gaz est purifié, comprimé et conditionné. Les normes de matériaux et de cimentation restent critiques pour l'intégrité à long terme. Le cadre réglementaire français s'appuie actuellement sur le Code minier (titres de substances) en l'absence d'un régime spécifique européen pour l'hydrogène natif. Les premiers projets de production pilote sont anticipés en France à l'horizon 2028-2029.

### 4. Compilation des détails des forages de type Eavor commencés en 2019 au Canada avec Shell, et des projets allemands de même nature

Le démonstrateur Eavor-Lite, foré en 2019 près de Rocky Mountain House (Alberta) en partenariat avec Shell New Energies et Precision Drilling, constitue le premier système multilatéral fermé à échelle commerciale. Deux sites distants de 2,5 km ont accueilli chacun un forage vertical jusqu'à 2 400 m TVD, équipé d'un casing de 7 pouces. Deux laterals d'environ 1,7 km ont été forés en 6 1/8 pouces en trou ouvert et intersectés toe-to-toe par ranging magnétique. Le système Rock-Pipe, traitement chimique de la paroi du puits pendant le forage, a scellé les laterals sans pose de casing acier, garantissant l'isolement hydraulique et limitant les pertes et les risques d'effondrement. Un pipeline de surface a fermé la boucle. Le thermosiphon a été démontré avec un uptime supérieur à 95 % et une performance thermique dans les 2 % des prévisions. Plus de 11 250 MWh thermiques ont été produits au cours des deux premières années d'exploitation.

Les projets commerciaux, notamment Geretsried en Bavière, forent depuis un même pad ou des pads très rapprochés. Les laterals atteignent 3 km et plus, pour des profondeurs mesurées dépassant 8 000 m. Les diamètres de trou de 8 à 8,5 pouces sont désormais privilégiés pour augmenter la surface d'échange. Le même principe de traitement de paroi (Rock-Pipe ou équivalents) est appliqué afin d'approcher un cycle fermé continu à motorisation minimale et sans traitement de solides.

Le profil multilatéral illustré (sections verticales à 349 degrés, TVD de l'ordre de 4 200 à 4 500 m, branches horizontales en éventail avec intersections multiples et sidetracks formant un réseau de doigts) représente la configuration la plus dense de ce type de radiateur souterrain fermé. Une branche alimente un fluide plus dense et plus froid qui intercepte successivement les branches chaudes de gravité moindre. Le fluide reste entièrement isolé de la formation. La connexion est uniquement thermique. Cette architecture maximise le volume de roche contacté tout en préservant un cycle fermé continu, sans dépletion de réservoir et avec une motorisation réduite au minimum grâce au thermosiphon. Elle constitue le modèle de référence pour un déploiement à faible impact et haute disponibilité.

## Liste des références

Eavor Technologies. Eavor-Loop Demonstration Project reports and performance updates, 2019-2023. <https://eavor.com> et documents ERA Alberta / Natural Resources Canada.

Toews M. et al. Multilateral closed-loop geothermal system results, Stanford Geothermal Workshop et publications associées, 2020-2022.

Eavor technical updates Geretsried project, 2025-2026. <https://eavor.com/blog>.

Ravier G. et al. Ageli project lithium carbonate from Upper Rhine Graben geothermal brine, European Geothermal Congress documentation, 2025.

La Française de l'Énergie. PTH-2 well results and REGALOR II program announcements, 2026.

Adams B. et al. Thermosiphon effect in CO2 plume geothermal systems, Energy journal and Stanford papers, 2014-2021.

Span R., Wagner W. Equation of state for carbon dioxide, Journal of Physical and Chemical Reference Data, 1996.

Publications AMPP et cas d'étude Salton Sea sur performances des tubulars CRA et MLT en saumures géothermiques corrosives, 2025.

Règlement (UE) 2024/1252 Critical Raw Materials Act ; Directive 2009/31/CE CCS ; Règlement NZIA 2024/1735 ; Code minier français réformé 2025.

## Définition des acronymes

CAPEX : Capital Expenditure (dépenses d'investissement).

CCS : Carbon Capture and Storage (captage et stockage du carbone).

CRA : Corrosion Resistant Alloy (alliage résistant à la corrosion).

DLE : Direct Lithium Extraction (extraction directe du lithium).

DST : Drill Stem Test (test de production en cours de forage).

MLT : Mechanically Lined Tubular (tubulaire mécaniquement liné).

NZIA : Net-Zero Industry Act.

OPEX : Operational Expenditure (dépenses opérationnelles).

sCO2 : supercritical Carbon Dioxide (dioxyde de carbone supercritique).

TVD : True Vertical Depth (profondeur verticale vraie).

URG : Upper Rhine Graben (fossé rhénan supérieur).